

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

VLIV TEPLoty VZDUCHU NA VYBRANÉ MECHANICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA

**INFLUENCE OF TEMPERATURE ON SELECTED MECHANICAL PROPERTIES OF
WOOD**

Student:

Otrubová Klára

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jana Daňková, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Zadání bakalářské práce

Student: **Klára Otrubová**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R019 Stavební hmoty a diagnostika staveb
Téma: **Vliv teploty vzduchu na vybrané mechanické vlastnosti dřeva**
Influence of temperature on selected mechanical properties of wood
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je ověření vlivu teploty na pevnostní a tuhostní vlastnosti dřeva. Předpokládané členění práce:

1. Úvod
2. Teoretická část - rešerše
3. Experimentální část - laboratorní zkoušky na vybrané dřevině
4. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

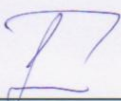
HORÁČEK, P. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. 1.vyd. Brno: MZLU, 1998. 124s. ISBN 80-7157-347-7
POŽGAJ, A. a kol. Štruktúra a vlastnosti dreva. 1.vyd. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.
ČSN 49 0108 Drevo. Zjisťovanie hustoty. Praha: ČNI, 1993.
ČSN 49 0110 Drevo. Medza pevnosti v tlaku v smere vláknien. Praha: ČNI, 1979.
a další normy a odborné publikace dle pokynů vedoucího práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Daňková, Ph.D.**

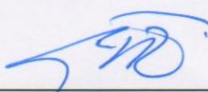
Datum zadání: 30.10.2015

Datum odevzdání: 02.05.2016



Ing. Libor Židek
vedoucí katedry



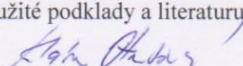


prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 30.4.2016

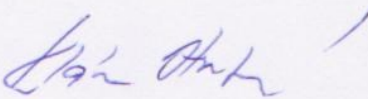

.....

Klára Otrubová

PROHLÁŠENÍ

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Ostravě dne 30.4.2016



.....

Klára Otrubová

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vybranými mechanickými vlastnostmi dřeva smrku, latinský název *Picea abies*. Pomocí experimentálních metod byly zjišťovány mechanické vlastnosti dřeva smrku v tlaku ve směru vláken a následně byl zjišťován modul pružnosti v tlaku ve směru vláken. Při laboratorních zkouškách byl sledován vliv nízkých teplot. Malá bezvadá zkušební tělesa byly vystavena teplotám -18 °C, -5 °C, 5 °C a 20 °C. Následně byl zkoumán vliv těchto teplot na pevnost v tlaku ve směru vláken a na modul pružnosti v tlaku ve směru vláken.

Získané výsledky experimentálního měření jsou zpracovány pomocí statistických metod. Pro rychlejší orientaci a přehlednost jsou zpracovány ve formě tabulek a grafů. Výsledky jsou navzájem porovnány.

Klíčová slova:

Smrk, mechanické vlastnosti, teplota, vliv

Summary:

The bachelor thesis deals with the selected mechanical characteristics of spruce wood, *Piceaabies* in Latin. Thanks to the experimental methods, the mechanical characteristics of spruce wood in the pressure in the direction of fibres were determined. Subsequently, the module of elasticity in the pressure in the direction of fibres was determined. At laboratory tests, the influence of low temperatures was observed. Small defectless trial bodies were faced with the temperatures of -18 °C, -5 °C, 5 °C a 20 °C. Subsequently, the influence of these temperatures on the solidity in the pressure in the direction of fibres and on the module of elasticity in the pressure in the direction of fibres was observed.

The observed results of the experimental measurement are processed with help of statistical methods tables. For quicker orientation and overview, they are processed in the form of tables and graphs. The results are mutually compared.

Keywords:

Spruce wood, mechanical characteristics, temperature, influence

OBSAH

1.	ÚVOD	1
2.	VLASTNOSTI DŘEVA.....	3
2.1.	MATERIÁL	3
2.2.	MECHANICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA	5
2.2.1.	MECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ.....	6
2.2.2.	PRUŽNOST DŘEVA	8
2.2.2.1.	MODUL PRUŽNOSTI.....	9
2.2.3.	PEVNOST DŘEVA.....	10
2.2.3.1.	PEVNOST DŘEVA V TLAKU	11
2.2.3.1.1.	PEVNOST DŘEVA V TLAKU VE SMĚRU VLÁKEN	12
2.3.	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ MECHANICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA	13
2.3.1.	HUSTOTA DŘEVA A DŘEVNÍ HMOTY	13
2.3.2.	VLIV VLHKOSTI.....	13
2.3.3.	VLIV TEPLoty.....	14
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	17
3.1.	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	17
3.2.	ZJIŠŤOVÁNÍ VLHKOSTI PŘI FYZIKÁLNÍCH A MECHANICKÝCH ZKOUŠKÁCH (ČSN 49 0103)	18
3.3.	ZJIŠŤOVÁNÍ HUSTOTY (ČSN 49 0108)	21
3.4.	KLIMATIZACE VZORKŮ	22
3.5.	MEZ PEVNOSTI V TLAKU VE SMĚRU VLÁKEN (ČSN 49 0110).....	24
3.6.	METODA ZJIŠŤOVÁNÍ MODULU PRUŽNOSTI V TLAKU PODÉL VLÁKEN	30
3.7.	PŘEPOČET PEVNOSTI A MODULU PRUŽNOSTI NA 12% VLHKOST DŘEVA.....	32
3.8.	METODA ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT (STATISTICKÁ METODA)	33
3.9.	VÝSLEDKY	35
3.9.1.	STATISTICKÉ HODNOSTY PRO MEZ PEVNOSTI VE SMĚRU VLÁKEN	35
3.9.2.	STATISTICKÉ HODNOTY PRO MODUL PRUŽNOSTI VE SMĚRU VLÁKEN	36
4.	ZÁVĚR	38
	Seznam použité literatury	41

Seznam obrázků	42
Seznam tabulek	43
Seznam grafů	43

1. ÚVOD

Dřevo patří k nejstarším stavebním materiálům, jehož použití je datováno již od pravěku. V současnosti jsou dřevěné konstrukce ve velkém rozvoji, díky svým vlastnostem. Dřevo je přírodní materiál a představuje obnovitelný zdroj. Jedná se o organický, nehomogenní, anizotropní a hygroskopický materiál.

Dle normy ČSN EN 844-1 je pojem dřevo rozlišován na dřevo a dříví. Dřevo definujeme jako substanci mezi dřením a kůrou stromu nebo keře, obsahující lignin a celulózu. Dříví je definované jako dřevo v podobě stojících nebo pokácených stromů, nebo ve formě jejich prvního zpracování. [5]

Dřevo je hojně využívaným materiálem díky své lehkosti, snadné opracovatelnosti a díky dobrým izolačním vlastnostem. Je možné jej tvarovat do složitějších geometrických tvarů a vyrobit prvky velkých rozměrů.

Využití smrkového dřeva je velmi rozšířené. Velmi oblíbené je pro výrobu nábytku, pro výrobu podlahových krytin, v truhlářském a tesařském odvětví, v papírnictví a důležitým materiálem pro vytápění. Smrkové rezonanční dříví se používá pro výrobu klavírů, houslí a jiných hudebních nástrojů. Jinými slovy smrkové dřevo je nejen nejčastějším jehličnatým porostem v České Republice, ale je také velmi univerzální z hlediska použití a následné výroby.

Cílem této bakalářské práce je zjištění vlivu teploty vzduchu na mechanické vlastnosti smrkového dřeva. Vliv teploty je nutné znát pro další použití dřeva. Při navrhování stavebních konstrukcí je nutné znát pevnost dřeva a modul pružnosti, jelikož stavební konstrukce navrhujeme tak, aby byly únosné a vydržely dlouho. Tyto potřebné informace využíváme nejen při navrhování tesařských konstrukcí ale i při samotných výstavbách dřevostaveb nebo při použití dřeva jako obvodových plášťů roubenek.

Malá bezvadná tělesa jsou vysušena do ustálené hmotnosti a následně vystavena čtyřem různým teplotám. Je kladen důraz na dodržení klimatu pro uchování vzorků tak, aby se hmotnost vysušených vzorků nezměnila. Jednotlivé sady vzorků jsou následně vystaveny čtyřem předem daným teplotám, pomocí speciálních zařízení a následně jsou podrobeny zkoušce meze pevnosti v tlaku ve směru vláken a metodě zjišťování modulu pružnosti v tlaku ve směru vláken. Cílem je porovnat dosažené hodnoty u čtyř skupin vzorků, kdy každá sada byla podrobena jiné teplotě,

zjistit jejich odchylky, rozlišnosti a následně stanovit pomocí těchto hodnot vliv teploty vzduchu na mechanické vlastnosti smrkového dřeva. Následně porovnat s vědeckými texty a určit příčinu změn.

2. VLASTNOSTI DŘEVA

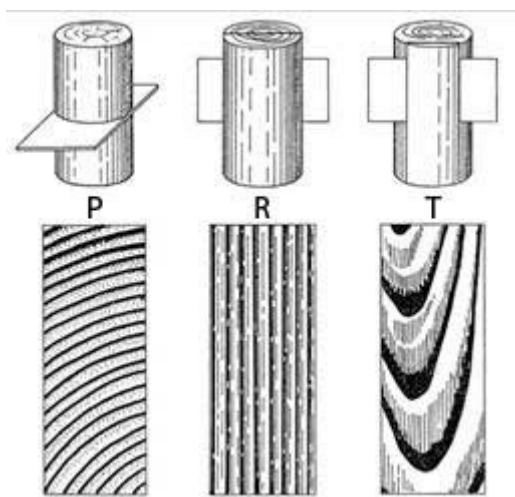
2.1. MATERIÁL

Dřevina: Smrk ztepilý (*Picea abies*)

Rozměry:

- Cca 20mmR (radiálně)
- Cca 20mmT (tangenciálně)
- Cca 30mmL (longitudinálně)

Dřevo má zvláštní strukturu, která je obvykle zkoumána ve třech základních řezech a směrech, mezi základní řezy kmene patří příčný řez, radiální řez a tangenciální řez (Obr.1)



Obrázek 1 : Schématické znázornění základních řezů kmenem, P-příčný řez, R-radiální řez, T-tangenciální řez [9]

Smrk, botanický název smrk ztepilý, latinský název *Picea abies*. Jedná se o stálezelený jehličnatý strom s rovným kmenem. Koruna je štíhle jehlancovitá, větve v ní vyrůstají v pravidelných přeslenech. Kořenový systém je plochý a mělký. Díky své výšce až 50 m a průměru 0,8-1,2 m, je oblíbeným materiálem pro stavební konstrukce. Smrkové dřevo je nejběžnější dřevinou v severní a střední Evropě. Smrkové dřevo nemá znatelné jádro, barva dřeva je bělavá až nažloutlá a působením světla žloutne. Tvrdost dřevní hmoty je měkká a oproti jiným dřevinám je smrkové dřevo lehké. Obecné vlastnosti smrkového dřeva viz tabulka (Tab.1). [10]

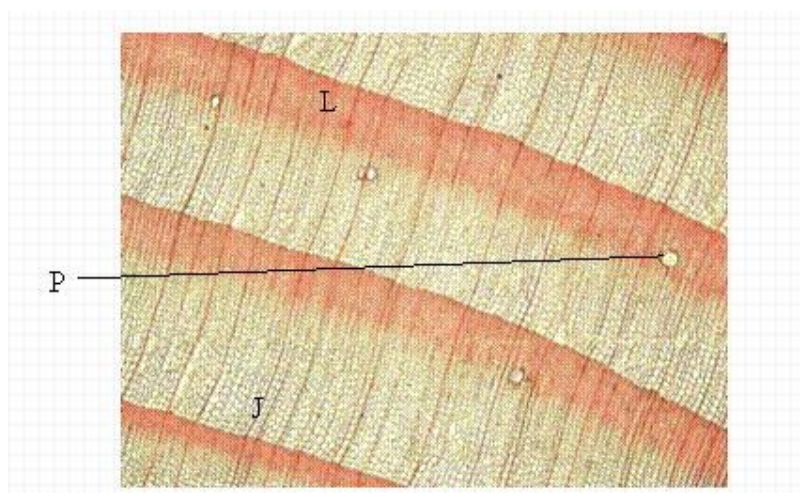
Tabulka 1: Obecné vlastnosti smrku ztepilého [10]

	Hustota [kg/m ³]	Tah [MPa]		Tlak [MPa]		Modul pružnosti [MPa]	Tvrdost [MPa]	Štípatelnost
		Rovnoběžně s vlákny	Kolmo na vlákna	Rovnoběžně s vlákny	Kolmo na vlákna			
Smrk	440	84	1,5	30	4,1	9100	<40	Dobrá

Letokruhy jsou v příčném řezu dobře viditelné (Obr.2). Pryskyřičné kanálky jsou viditelné převážně v podélných řezech (Obr.3), jsou patrné jako krátké čáry. Dřevina je charakteristická přítomností vyzrálého dřeva, které v čerstvém stavu voní po pryskyřici.



Obrázek 2: Příčný řez smrkovým dřevem [9]



Obrázek 3: Mikroskopická struktura smrkového dřeva, J-Jarní dřev, L-Letní dřev, P-Pryskyřičný kanálek podélný [9]

2.2. MECHANICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA

Dřevo díky svým mechanickým vlastnostem můžeme zařadit mezi materiály s bohatým využitím nejen ve stavebnictví. Mezi nejdůležitější mechanické vlastnosti patří pevnost a pružnost, kdy pevnost je i díky nízké hmotnosti dobrá.

Mechanické vlastnosti dělíme dále na dvě základní skupiny a to na základní a odvozené mechanické vlastnosti:

Základní:

- Pružnost
- Pevnost
- Plasticita
- Houževnatost

Odvozené:

- Tvrdost
- Odolnost vůči tečení
- Odolnost proti trvalému zatížení
- Odolnost proti únavovému lomu

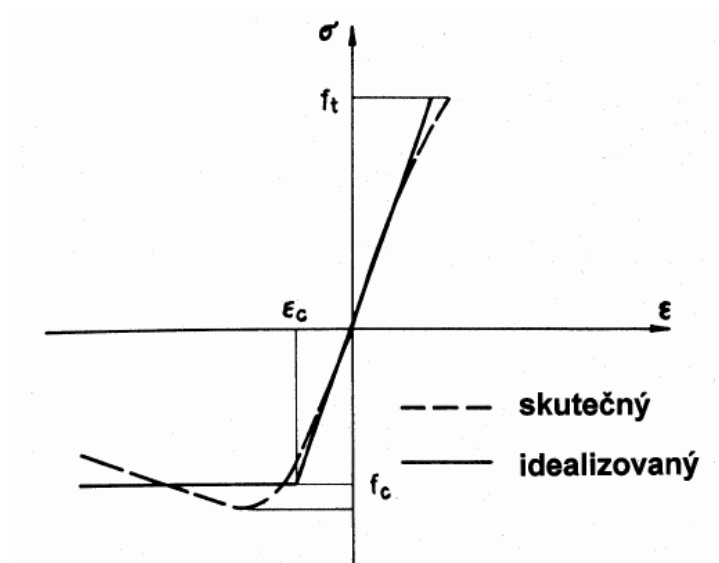
Další skupinou, kterou nelze u mechanických vlastností zanedbat jsou technologické vlastnosti.

Technologické vlastnosti:

- Obrobitelnost
- Ohýbatelnost, plastičnost
- Způsobilost spojování
- Štípatelnost
- Způsobilost úspěšného dokončení povrchu

Vlastnosti dřeva jsou odlišné ve zkoušení kolmo k vláknům a ve směru k vláknům. Navzájem se mění i v radiálním směru a tangenciálním směru. Rozdíl v mechanických vlastnostech v podélném a kolmém směru závisí na vazbových energiích chemických složek dřeva, kdy na výsledku v podélném směru mají vliv kovalentní vazby a na výsledku v kolmém směru mají vliv vodíkové vazby. [7]

Pracovní diagram dřeva pro namáhání v tlaku/tahu rovnoběžně s vlákny. (Obr.4)



Obrázek 4: Pracovní diagram dřeva pro namáhání v tlaku/tahu rovnoběžně s vlákny [9]

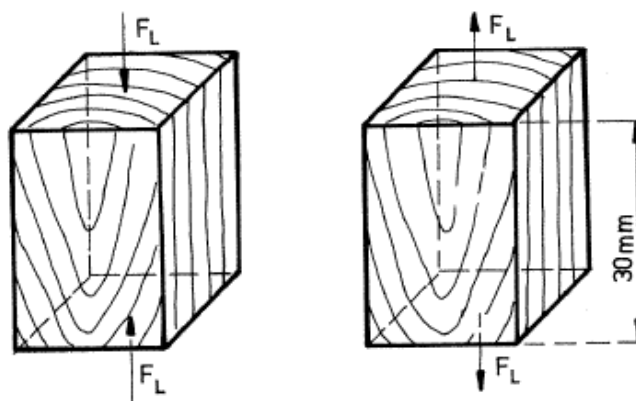
2.2.1. MECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ

Jedná se o proces, při kterém dochází k interakci mezi mechanickými silami nebo jinými činiteli namáhání a dřevem. Výsledkem jsou dočasné nebo trvalé změny tvaru dřeva. Namáhání můžeme dělit podle fyzikálního působení na mechanické, tepelné, chemické, vlhkostní anebo jejich vzájemné kombinace. Namáhání může působit na povrchu, nebo může působit na celý objem tělesa. Při zpracování dřeva do finálního produktu působí především mechanické, vlhkostní a tepelné namáhání, které vzniká při lisování, ohýbání, sušení a dalších. Při použití dřeva na stavební konstrukce musíme uvažovat s časovým faktorem, který v závislosti s mechanickým a vlhkostním namáháním deformuje dřevo zejména v ohybu. [7]

Rozlišujeme čtyři základní druhy mechanického namáhání, kterým jsou namáhání na tah a tlak, smyk, ohyb a kroucení.

TAH A TLAK

Tah nastává v situaci, kdy síla tahá průřez a vnitřní síly působí kolmo na ni. V takovém případě se dřevěná vlákna natahují a při dosažení meze pevnosti se vlákna přetrhnou. Tlak nastává v situaci, kdy vnější síla působí na průřez, poté se dřevěná vlákna stlačují a po dosažení meze pevnosti se vlákna stlačí. [7]



Obrázek 5: Tah a tlak znázorněný na dřevěných bezvadných tělesech

↓ F_L ... Vnější síla působící na průřez – tlak

↑ F_L ... Tahající síla – tah

Smrkové dřevo má odlišné vlastnosti než ostatní jehličnaté dřeviny, porovnání pevností (Tab.2).

Tabulka 2: Porovnání smrkového dřeva s ostatními jehličnatými dřevinami [10]

	Hustota [kg/m ³]	Tah [MPa]		Tlak [MPa]		Modul pružnosti [MPa]	Smyk [MPa]
		Rovnoběžně s vlákny	Kolmo na vlákna	Rovnoběžně s vlákny	Kolmo na vlákna		
Jedle	430	78	1,4	33	4,7	9600	5,5
Smrk	440	84	1,5	30	4,1	9100	5,3
Borovice	530	102	2,9	54	7,5	11750	9,8
Modřín	600	105	2,2	54	7,3	13500	8,8

SMYK

Smyk nastává v situaci, kdy se výslednice vnějších sil snaží vzájemně posunout sousední vlákna je jejich rovinách. Průřez se posune a dřevo se poruší usmyknutím. [7]

OHYB

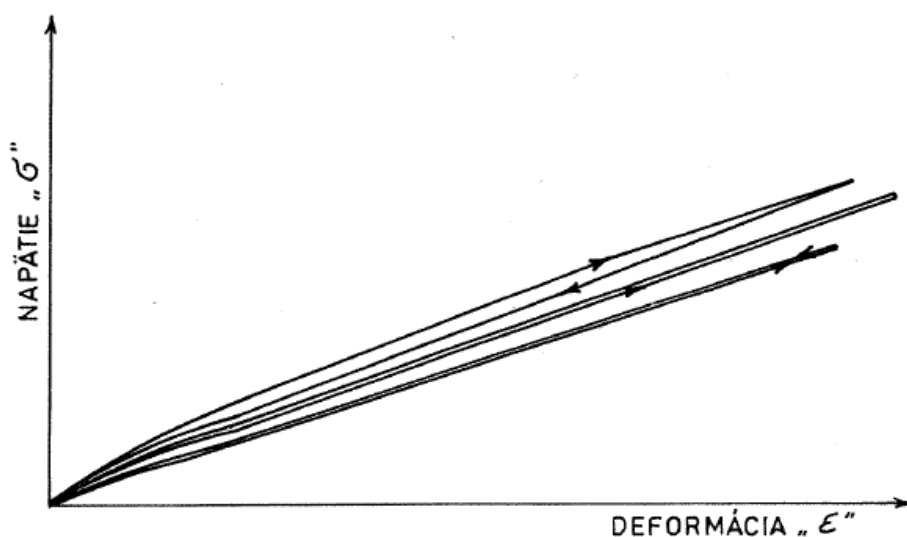
Ohyb nastává v situaci, kdy otáčivý moment působí na těleso kolmo k průřezu. Následně v něm vznikají normální a tangenciální napětí, které způsobují buď jeho pootočení, nebo ohyb. Jakmile dosáhne meze pevnosti. Dřevo se zlomí. [7]

KROUCENÍ

Kroucení vzniká, když otáčivý moment působí v rovině průřezu. Následně se vlákna dřeva od sebe odchylují a výsledným porušením je zkroucení. [7]

2.2.2. PRUŽNOST DŘEVA

Pružnost dřeva je všeobecně definována jako schopnost dřeva dosahovat původního tvaru a rozměru po uvolnění vnějších sil. Při měření deformací způsobených pružností dřeva, pomocí běžných přístrojů jako jsou tenzometry, odchylkometry a jiné, je možné pružnost pokládat za návratný proces, jelikož po uvolnění vnějších se dřevěné těleso vrátí do původního tvaru. [8]



Obrázek 6: Diagram napětí - deformace smrkového dřeva v tlaku ve směru vláken pod mezí úměrnosti [7]

Charakteristiky kvantifikující pružnost:

E ... Modul pružnosti

μ ... Poissonovo číslo

σ_u ... Mez úměrnosti

w_p ... Energie pružné deformace

2.2.2.1. MODUL PRUŽNOSTI

Moduly pružnosti vyjadřují vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti větší, tím větší napětí je potřebné k vyvolání deformací. Rozlišujeme moduly pružnosti při normálových namáháních (tlak, tah, ohyb) a smykové moduly při namáhání tangenciálních (smyk a krut). Moduly pružnosti představují důležité materiálové konstanty při statických výpočtech dřevěných konstrukcí. [8]

MODUL PRUŽNOSTI V TAHU A TLAKU

Modul pružnosti v tahu a tlaku je charakterizován podílem napětí a poměrné deformace podle známého vztahu:

$$E_i = \frac{d.\sigma_i}{d.\varepsilon_i} [MPa] \quad /2/$$

Pokud do známého vztahu dosadíme vyjádření napětí a poměrné deformace vypočítáme modul pružnosti v tahu a tlaku dle vzorce:

$$E = \frac{F_{\dot{u}} \cdot l}{S \cdot \Delta u_1} [MPa] \quad /3/$$

$F_{\dot{u}}$... Síla na mezi úměrnosti [N]

l ... Původní délka tělesa před silovým působením [m]

S ... Plocha na kterou síla D působila [m²]

Δu_1 ... Absolutní celková pružná deformace ve směru silového působení [m]

Průměrná hodnota modulu pružnosti pro dřevo v tahu a tlaku ve směru vláken se pro domácí dřeviny udává v rozpětí 10000 – 15000 MPa při průměrné absolutní vlhkosti 12 %. [7]

2.2.3. PEVNOST DŘEVA

Pevnost dřeva charakterizuje odpor (odolnost) dřeva proti jeho trvalému porušení. Kvantitativně se pevnost vyjadřuje napětím, při kterém se poruší soudržnost tělesa napětím na mezi pevnosti σ_p . Pevnosti dřeva se zjišťují pomocí laboratorních zkoušek, při kterých je sledována síla v okamžiku porušení dřevěného tělesa. Výjimkou je pevnost v tlaku napříč vláken, kterou můžeme definovat také jako konvekční pevnost, u které nelze dosáhnout porušení tělesa. [7]

Podle fyzikální povahy veličin, kterými definujeme pevnost, rozlišujeme tři druhy pevnosti:

- Konvekční pevnost
- Skutečná pevnost
- Ideální nebo teoretickou pevnost

KONVEKČNÍ PEVNOST

Definuje se největším neskutečným napětím, který vyjadřuje určitý stav při zatěžování. Tato hodnota bývá vyjadřována jako největší napětí vztahující se na průřez zkušebního tělesa. Z hlediska praktického zkoušení dřeva tato pevnost nepřichází do úvahy. [7]

SKUTEČNÁ PEVNOST

Definuje se skutečnou hodnotou napětí v okamžiku přerušení tělesa.

IDEÁLNÍ PEVNOST

Jedná se o maximální teoretickou hodnotu pevnosti dřeva, která může být dosažena na konkrétní dřevině a přesně specifikovaných podmínkách zatěžování. Vzhledem k tomu, že dřevo je organický materiál, jehož chemické složky obsahují různé druhy vazeb, je velmi nepravděpodobné vypočítat jeho teoretickou pevnost.

Konkrétní údaje o pevnosti dřeva získáváme pomocí zkoušek, při kterých je nutné dodržovat přesně stanovený postup. Základní zásady zkoušení pružnostních a pevnostních charakteristik dřeva a dřevěných kompozitů nalezneme podrobně popsány v odborných publikacích. [7]

Podle způsobu zatěžování dělíme pevnost na:

- Pevnost v tahu
- Pevnost v tlaku
- Pevnost v ohybu
- Pevnost v kroucení
- Pevnost ve smyku

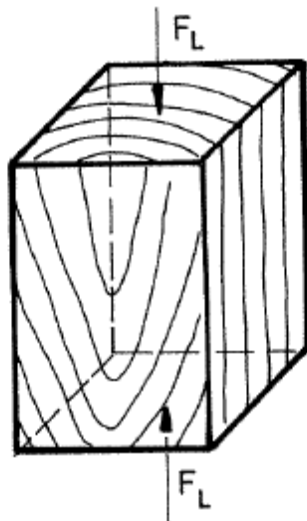
2.2.3.1. PEVNOST DŘEVA V TLAKU

S ohledem na směr působící síly k orientaci vláken a letokruhů dřeva rozlišujeme:

- Pevnost v tlaku ve směru vláken ($\sigma_{p||}$)
- Pevnost v tlaku kolmo na vlákna v radiálním směru ($\sigma_{p \text{ kolmo } R}$)
- Pevnost v tlaku kolmo na vlákna v tangenciálním směru ($\sigma_{p \text{ kolmo } T}$)

2.2.3.1.1. PEVNOST DŘEVA V TLAKU VE SMĚRU VLÁKEN

Jedná se o nejdůležitější vlastnost dřeva v porovnání s ostatními pevnostmi. Působením tlaku na těleso podél vláken dojde k deformaci, projevující se zkrácením délky tělesa. Charakter deformace závisí na jakosti a stavbě dřeva. Důležitými činiteli jsou hustota a vlhkost dřeva.



Obrázek 7: Pevnost v tlaku ve směru vláken ($\sigma_{p||}$) [7]

Průměrná hodnota meze pevnosti v tlaku ve směru vláken u dřev s vlhkostí 12 % je cca 50 MPa. Variační koeficient se pohybuje v rozmezí 8-16 %.

Mez úměrnosti v tlaku podél vláken z meze pevnosti je u jehličnatých dřevin zhruba $\frac{1}{2} * \sigma_p$. Nejnížší mez úměrnosti mají tvrdé listnaté dřeviny, což dokazují podrobné analýzy. Lze to vysvětlit pravidelnou strukturou jehličnatých dřevin.

Mez pevnosti se vypočítá dle vztahu:

$$\sigma_p = \frac{F_{max}}{a \cdot b} [MPa] \quad /4/$$

F_{max} ... Síla na mezi pevnosti [N]

a, b ... příčné rozměry tělesa [m]

2.3. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ MECHANICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA

2.3.1. HUSTOTA DŘEVA A DŘEVNÍ HMOTY

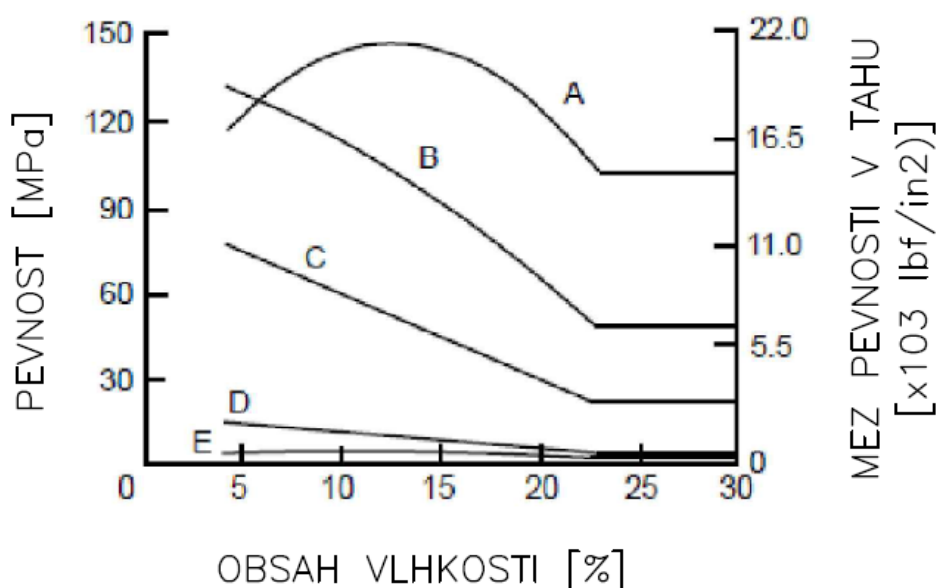
Mezi modulem pružnosti a hustotou dřeva při tlaku ve směru vláken platí kladný lineární vztah. Nárůst hustoty smrkového dřeva o $0,1 \text{ g.m}^{-3}$ způsobí zvětšení modulu pružnosti E podél vláken o 1,9 až 4,4 % a v tangenciálním tlaku o 1,0 až 8,6 %. V tlaku ve směru vláken u smrkového dřeva platí, že zvyšování hustoty dřeva se nejvýrazněji projeví v suchém stavu a nejméně v mokřém stavu. Vztah mezi hustotou a pevností nemusí být vždy významný.

Hustota vlastní dřevní hmoty je stejná pro všechny dřeviny, činí přibližně 1500 kg.m^{-3} . Tato hodnota odpovídá hustotám hlavních složek dřeva, celulózy (s hustotou 1580 kg.m^{-3}) a ligninu (hustota 1400 kg.m^{-3}). [8]

2.3.2. VLIV VLHKOSTI

Vlhkost dřeva je definována jako hmotnost vody ve dřevě, vyjádřena v % hmotnosti absolutně suchého dřeva. Vlhkost ovlivňuje změnu rozměrů, únosnosti i další vlastnosti dřeva. Při nasycení činí cca 25 až 35 %, před samotným použitím dřeva, se materiál vysušuje, aby se zamezilo vzniku trhlin nebo napětí v materiálu. Absolutně vysušené dřevo, tj. dřevo, které neobsahuje žádnou vlhkost, se dle normy ČSN 49 0103 [1] získá vysušením do konstantní hmotnosti při teplotě $103 \pm 2 \text{ °C}$ ve speciální odvětrávané sušárně.

Pro smrkové dřevo platí: Při zatěžování v tlaku ve směru vláken je vztah napětí-deformace významně rozdílný při vlhkosti $w_a = 0 \text{ %}$ a nad bodem nasycení vláken. V nasyceném stavu je pevnost dřeva nižší téměř 3,8 krát, deformace na mezi úměrnosti víc než 2 krát a celková energie deformace téměř 7krát. Z toho vyplývá, že při tlaku ve směru vláken jsou namáhané i ty vazby, které byly oslabené vazbou vázané vody, takže vodíkovými vazbami vody bez celulózy nebo hemicelulózy. Z uvedené analýzy vyplývá, že pevnost v tlaku ve směru vláken významně klesá. [7]



Obrázek 8: Vliv vlhkosti na pevnost dřeva, A-Napětí ve směru vláken, B-Ohyb, C-Tlak ve směru vláken, D-Komprese kolmo k vláknům, E-Prodĺoužení kolmo k vláknům [11]

Vztah obsahu vlhkosti na suché dřevo je veden v grafu (Obr.8). Je zde předpoklad lineárního průběhu. [11]

2.3.3. VLIV TEPLoty

Dřevo je v průběhu vystaveno různým technologickým procesům, jako je sušení, lisování, plastifikace a vystaveno účinkům různých teplot, které na něj nepůsobí najednou, ale v různých intervalech a v různých teplotách mnohdy až 200 °C. Proto je nutné zkoumat změny ve struktuře dřeva kvůli možnostem vzniku pevnostních změn, které mohou ovlivnit jeho budoucí použití.

S rostoucí teplotou se pevnost a pružnost dřeva snižuje. Vztah mezi vlivem teploty a modulem pružnosti jsou lineární. Je zřejmé, že vlivem teploty na mechanické vlastnosti dřeva se pevnost a pružnost snižuje. Provedené experimenty dokazují, že nejmenší vliv teploty se projevuje na pevnosti ve směru vláken, citlivěji reagují vlastnosti kolmo na vlákna.

Při teplotě nad 200 °C se stává křehčí, snižuje se rázová houževnatost a nastupuje pyrolýza dřeva. Vlivem krátkodobého působení teploty do 70 °C vysušené dřevo mění svoje pevnostní vlastnosti, avšak pouze za dobu působení dané teploty, mechanické vlastnosti se mění pouze

přechodně. Výraznější pokles pevnosti a pružnosti dřeva můžeme zaznamenat až při dlouhodobém působení teploty 100 °C a více. Ve dřevě se vyskytují nenávratné změny a to i v případě, že se teplota opět sníží na nižší teplotu.

Podobně jako u vlhkosti platí, že vzrůstající teplotou dochází ke změnám mechanických vlastností dřeva. Při nárůstu teploty do 70 °C dochází jen k přechodnému snížení pružnosti a pevnosti, avšak při nárůstu teploty nad 100 °C vznikají ve dřevě trvalé změny. Je proto nutné uvádět přepočet pevnosti dřeva vlivem teploty na 20 °C dle vztahu [7]:

$$\sigma_{20} = \sigma_t + \beta(t - 20)[MPa] \quad /5/$$

β ... opravný koeficient udávající změnu pevnosti dřeva při změně teploty o 1 °C

t ... teplota dřeva [°C]

Tento vztah je možné použít pro rozmezí teplot 20 – 100 °C. Opravný koeficient na 1 °C pro smrkové dřevo je 0,25 MPa v tlaku ve směru vláken. Doporučuje se nejdříve přepočítat výsledky pevnosti na 12 % vlhkost dřeva a poté na teplotu 20 °C.

Vliv nižší teploty a vyšší vlhkosti zapříčiňuje změny v pevnostních vlastnostech dřeva, jedná se především o vytváření ledové mřížky vyplňující dřevěné buňky. Při pokojové teplotě nemá vlhkost nad bodem nasycení vliv na pevnost, ale při nízké teplotě pevnost dřeva s vlhkostí nad bodem nasycení narůstá, při 85 % vlhkosti dosahuje maxima a poté se opět snižuje. Tato změna je zapříčiněna vznikem ledu. [7]

Tvar a velikost zkušebního tělesa jsou důležitým faktorem při analýze vlivu teploty. Pokud je zkušební vzorek vystaven požadované teplotě v krátkém čase, vnitřní část zkušebního tělesa nedosáhne teploty okolního prostředí. Je proto nutné zohlednit druh zatížení vzhledem k tomu, že vnější vlákna zkušebního tělesa budou vystavena největšímu namáhání a obvykle jsou hlavní částí pro stanovení meze pevnosti. Teplota vnitřní části zkušebního tělesa může mít malý význam. [6]

Vliv nízké teploty je nutné znát pro aplikaci dřeva v prostředí s nízkou teplotou. Pokud je dřevo použito pro dřevěnou střechu je nutné, aby odolávalo tlaku z účinků sněhu a nízké teploty. Dřevo je ohrožováno i během venkovního skladování, kdy v zimním období dochází

k ovlivnění mechanických vlastností. Neexistuje žádná systematická studie hodnotící účinek nízkých teplot na mechanické vlastnosti dřevěných materiálů. Výzkumy ukázaly, že mechanické vlastnosti dřeva mají tendenci zvyšovat se, když se dřevo ochladí pod pokojovou teplotu. Bylo zjištěno, že modul pružnosti se s klesající teplotou od 66 °C do -18 °C pro dřevo s 12 % obsahem vlhkosti monotónně zvýšil. Pro smrk bylo zjištěno navýšení meze pevnosti o 0,13 %. Studie byly vyzkoušeny na mechanických vlastnostech dřeva vysušeného vzduchem. [11]

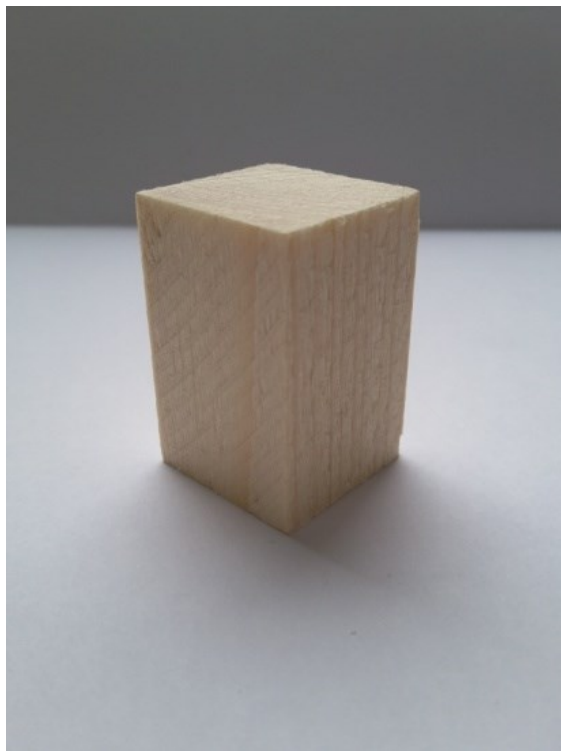
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části bakalářské práce bylo zjistit vliv vzduchu na vybrané mechanické vlastnosti dřeva.

3.1. PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Pro experimentální část bakalářské práce byl použit smrk ztepilý. Tento materiál byl následně zpracován do malých bezvadých těles, jehož velikost je dána normativními předpisy. Tělíska byla vyrobeny z jednoho kusu dřeva.

Rozměry malého bezvadého tělesa byly 20mmR (radiálně) x 20mmT (tangenciálně) x 30mmL (longitudinálně) [3]. Jednalo se o tělesa, která nesmí obsahovat vady dřeva, jako jsou například trhliny, suky (Obr.10), poškození hmyzem (Obr. 11), hniloba aj. Další podmínkou pro výběr bylo, aby tělísko obsahovalo minimálně 5 ročních letokruhů.



Obrázek 9: Smrkové bezvadé tělísko

Pro jednotlivé měření byly potřeba vybrat čtyři sady vzorků, kdy podle normy ČSN 49 0110 [3] musel být počet zkušebních těles minimálně 30. Pro možný výskyt chyb bylo určeno 5 náhradních zkušebních tělísek. Jednotlivé vzorky byly pečlivě identifikovány pro další manipulaci. Názvy jednotlivých sad byly:

- V1 – Teplota -18 °C
- V2 – Teplota -5 °C
- V3 – Teplota 5 °C
- V4 – Teplota 20 °C



Obrázek 10: Vada dřeva - Suk



Obrázek 11: Vada dřeva - Poškození hmyzem

3.2. ZJIŠŤOVÁNÍ VLHKOSTI PŘI FYZIKÁLNÍCH A MECHANICKÝCH ZKOUŠKÁCH (ČSN 49 0103)

Pro zjištění vlhkosti smrkových tělísek byly použity tyto přístroje:

- Sušárna MEMMERT UF160 s nucenou cirkulací
- Digitální laboratorní váha s přesností vážení 0,01 g

Malá zkušební tělesa byla zvážena na laboratorní váze s přesností na 0,01 g. Následně se tělesa nechala vysušit v sušárně MEMMERT UF 160 (Obr.12) při teplotě 103 ± 2 °C na konstantní hmotnost tak aby se minimalizovala deformace a vznik trhlin. Vzhledem k tomu, že se jednalo o smrkové dřevo a tělíska byla malá, proběhlo první vážení po 6 hodinách. Další vážení proběhlo za další 2 hodiny a zjistilo se, že hodnoty byly stejné jako po 6 hodinách. Po vytažení ze sušárny proběhla také vizuální kontrola

tělísek, při které bylo zjištěno, že byly čtyři tělíska porušeny vznikem trhliny. Tyto vzorky byly ze sady odejmuty, a nahrazeny novými, které se vysušily stejným způsobem. Následně byl proveden výpočet v % dle následujícího vztahu pro každý soubor. /6/



Obrázek 12: Sušárna MEMMERT UF 160 s nucenou cirkulací

Výpočet každého zkušebního tělesa se vypočítá v procentech dle vztahu:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100[\%] \quad /6/$$

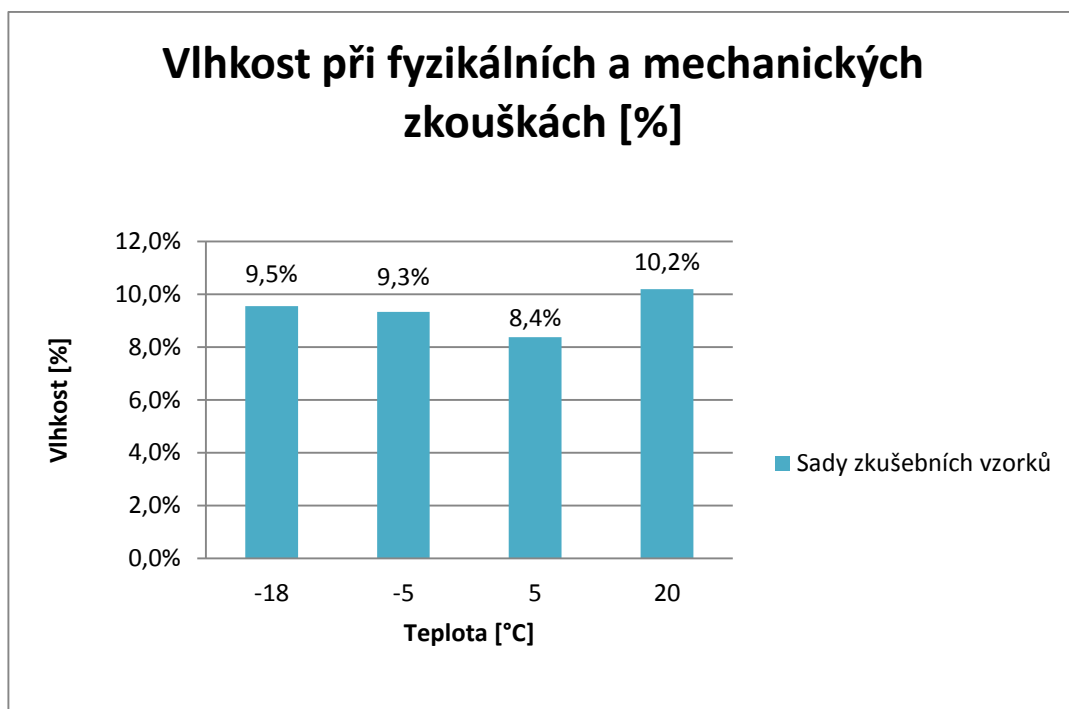
m₁ ... hmotnost zkušebního tělesa před vysušením [g]

m₂ ... hmotnost zkušebního tělesa po vysušení [g]

Poté byl vypočten aritmetický průměr výsledných vlhkostí v jednotlivých sadách a zaokrouhlil se na 0,1 %. Výsledné hodnoty viz (Tab.3). Porovnání jednotlivých vlhkostí jsou uvedeny v grafu 1. Následně byla tělíska uložena v exsikátoru, který byl pečlivě očištěn a připraven společně se silikagelem s indikátorem vlhkosti. Jednotlivé soubory vzorků byly do takto připraveného exsikátoru vloženy v uzavíratelných plastových pytlících, ve kterých byl použit také silikagel pro jistotu udržení potřebné vlhkosti.

Tabulka 3: Výsledné vlhkosti zkušebních souborů

Teplota [°C]	Vlhkost [%]
-18	9,5
-5	9,3
5	8,4
20	10,2



Graf 1: Vlhkost zkušebních vzorků

Bylo zjištěno, že vlhkosti souboru pro teploty -18 a -5 °C měly velmi podobnou vlhkost s rozdílem 0,2 %, zatímco rozdíly vlhkosti souborů 5 a 20 °C byly větší než 0,5 %.

3.3. ZJIŠŤOVÁNÍ HUSTOTY (ČSN 49 0108)

Pro zjištění hustoty smrkových tělísek byly použity tyto přístroje:

- Digitální posuvné měřítko s přesností na 0,01 mm
- Digitální laboratorní váha s přesností vážení na 0,01 g

Byla použita hmotnost po vysušení na konstantní hmotnost. Poté se změřily rozměry pomocí posuvného měřítka ve směru osy symetrie zkušebních tělísek. Následně byl proveden výpočet hustoty dle následujícího vztahu. /7/

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w \cdot b_w \cdot l_w} [kg \cdot m^{-3}] \quad /7/$$

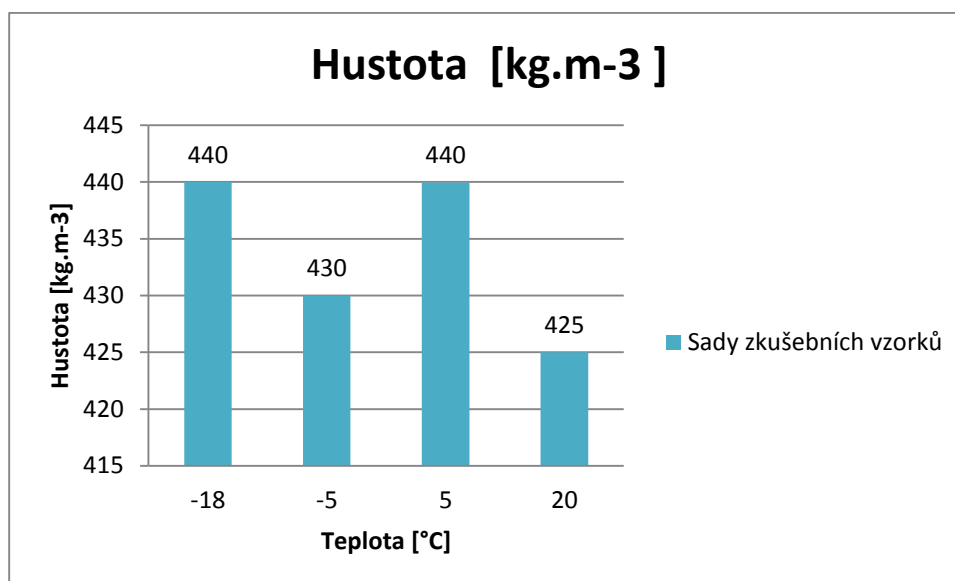
m_w ... hmotnost zkušebního tělíska [kg]

a_w, b_w, l_w ... rozměry zkušebního tělesa [m]

Poté se vypočetl aritmetický průměr hodnot v jednotlivých sadách a zaokrouhlil se na 5 kg.m⁻³. Výsledné hustoty viz (Tab.4). Porovnání jednotlivých hustot viz graf 2.

Tabulka 4: Výsledné hustoty jednotlivých souborů

Teplota [°C]	Hustota [kg.m ⁻³]
-18	440
-5	430
5	440
20	425



Graf 2: Hustota zkušebních vzorků

Nejmenší hustotu měly tělíska, které byly klimatizovány při teplotě 20 °C, zvláštní je, že vzorky klimatizované teplotou -18 °C a 5 °C dosáhly stejné hustoty. Tento faktor mohl mít velký vliv na následné zkoušení a zjišťování modulu pružnosti.

3.4. KLIMATIZACE VZORKŮ

Pro experimentální zkoušení byly vybrány tyto teploty:

- -18 °C
- -5 °C
- 5 °C
- 20 °C

Pro každou teplotu bylo připraveno 35 zkušebních smrkových tělísek, které byly vysušeny do konstantní hmotnosti a uloženy do exsikátoru. Pro klimatizaci vzorku s potřebnou teplotou -18, -5 a 5 °C byl použit mrazicí box Labor tech (Obr.13) a pro teplotu 20 °C byla použita klimatizační komora CTS (Obr.14).



Obrázek 13: Mrazicí box LABOR TECH



Obrázek 14: Klimatizační komora CTS

Každá sada vzorků byla klimatizována po dobu 2 dnů. Ihned po klimatizaci byly vzorky zváženy pomocí laboratorní váhy s přesností na 0,01 g a změřeny pomocí digitálního posuvného měřítka s přesností na 0,01 mm. Po klimatizaci byly zjištěny mírné odchylky v hmotnosti. Ihned po změření a zvážení byly takto klimatizované vzorky podrobeny dalšímu zkoušení.

3.5. MEZ PEVNOSTI V TLAKU VE SMĚRU VLÁKEN (ČSN 49 0110)

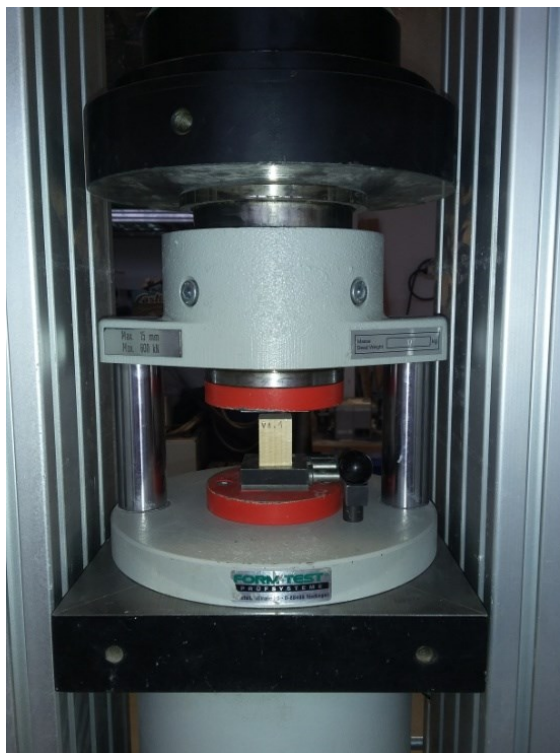
Pro tuto zkoušku byl použit tento přístroj:

- Zkušební stroj FORM+TEST Prüfsysteme CTS C-40/1000/S (Obr.15)



Obrázek 15: Zkušební stroj FORM+TEST CTS C-40/1000/S

Klimatizovaná zkušební tělíska se po zvážení a změření podrobila zkoušce v tlaku ve směru vláken. Zkušební tělísko se uložilo do středu tlačných desek lisu (Obr.16), ve kterém se rovnoběžně zatěžovalo při konstantní rychlosti. Podmínkou bylo, aby rychlost zatěžování byla taková, aby se zkušební tělísko porušilo za 300 ± 100 s od začátku zatěžování. Rychlost zatěžování byla potřeba upravit pro každou sadu zvlášť, jelikož bylo nutné dodržet maximální čas zatěžování. Jednotlivé rychlosti zatěžování viz (Tab.5).



Obrázek 16: Uložení zkušební vzorku do lisu

Tabulka 5: Rychlost zatěžování

Teplota zatěžovaných tělísek [°C]	Rychlost zatěžování [kN/s]
-18	0,08
-5	0,09
5	0,08
20	0,08

V průběhu zkoušky bylo zjištěno, že způsob porušení vzorků byl pro každou klimatizovanou teplotu odlišný.

U zkušebních vzorků V1, které byly klimatizovány při teplotě -18 °C, bylo porušení velmi plynulé. Ve většině případů došlo ke stlačení tělíska bez vzniku trhlin (Obr.17). U některých tělísek nastalo stlačení spolu s jemným odštěpením bočních částí (Obr.18). Také nastávalo porušení s výskytem jemných trhlin (Obr.19). Způsob poškození jednotlivých vzorků byl velice podobný, u všech nastalo stlačení. Největší stlačení vzorku bylo o 7,51 mm.



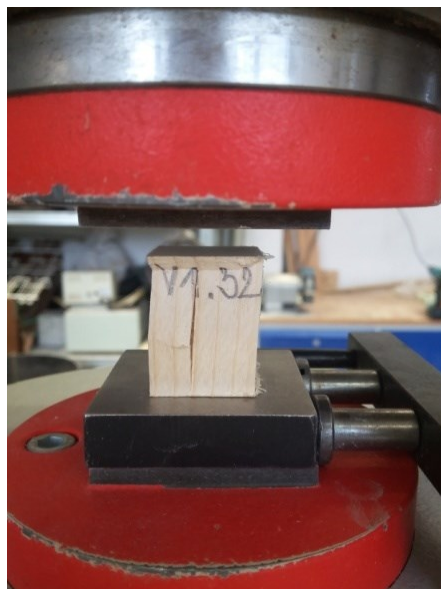
Obrázek 17: Příklad porušení vzorku při teplotě -18 °C



Obrázek 18: Příklad porušení vzorku při teplotě -18 °C



Obrázek 19: Příklad porušení vzorku při teplotě -18 °C



Obrázek 20: Příklad porušení vzorku při teplotě -18 °C

U této teploty nastala také situace porušení vznikem významné trhliny, avšak dosažení maximální síly nastalo v kratším čase než je povolený normou, proto byly tyto vzorky odstraněny a nebyly použity pro pozdější zpracování (Obr.20).

Zatěžování vzorků V2, které byly klimatizovány při teplotě $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, probíhalo podobně jako u vzorků V1, avšak u tohoto zatěžování nastalo porušení z více jak 50 % vznikem menších trhlin (Obr.21)(Obr.22). Ostatní tělíska byla porušena stlačením, avšak výsledek nebyl tak výrazný, jako u vzorků V1. Nastala zde také situace, kdy maximální síla byla zaznamenána v 518 sekundě a výsledná síla 43,18 kN nebyla použita pro další zpracovávání a vzorek byl vyřazen.



Obrázek 21: Příklad porušení vzorku při teplotě $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 22: Příklad porušení vzorku při teplotě $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$

U těles V3, které byly podrobeny klimatizaci při teplotě $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, byly způsoby porušení velmi odlišné. Zatímco u těles, které byly vystaveny minusovým teplotám, nenastalo porušení plynule. Výsledné porušení bylo např. vznikem trhliny, stlačením a odstěpením bočních vláken, spodním roztřípením vzorku (Obr.23), nebo zborcení tělíska na stranu s výskytem trhliny (Obr.24).



Obrázek 23: Příklad porušení vzorku při teplotě +5 °C



Obrázek 24: Příklad porušení vzorku při teplotě +5 °C

U této sady, ve dvou případech, vzniklo porušení před dovršením 100 s zatěžování. U tohoto zatěžování se u obou těles projevilo porušení rozlomením vzorku na dvě poloviny. Tento jev byl pravděpodobně způsoben porušením jádra vzorku následky klimatizace.

Vzorky V4, které byly klimatizovány při teplotě +20 °C, měly nejstabilnější hodnoty maximální síly v době porušení. U těchto vzorků se porušení, až na 6 případů, projevilo vznikem trhliny. Jednalo se o trhliny menší i trhliny výrazné po celé délce vzorku.

Po provedení zkoušky na tlak ve směru vláken bylo potřeba zpracovat hodnoty pro další použití. Norma udává minimální počet vzorků pro zkoušku 30, proto proběhla kontrola zjištěných hodnot a hodnoty, které byly příliš malé, nebo naopak příliš vysoké, nebo vzorky, jejichž čas porušení tělesa byl kratší, než povoluje norma, byly odebrány. Výslednou hodnotou tohoto zatěžování byla pevnost v tlaku, díky které následně získáme mez pevnosti v MPa dle vztahu /8/.

Mez pevnosti σ_w zkušebních tělísek získáme ze vztahu:

$$\sigma_w = \frac{F_{max}}{a.b} [MPa] \quad /8/$$

F_{max} ... Maximální zatížení [N]

a, b ... rozměry zkušebního tělíska [mm]

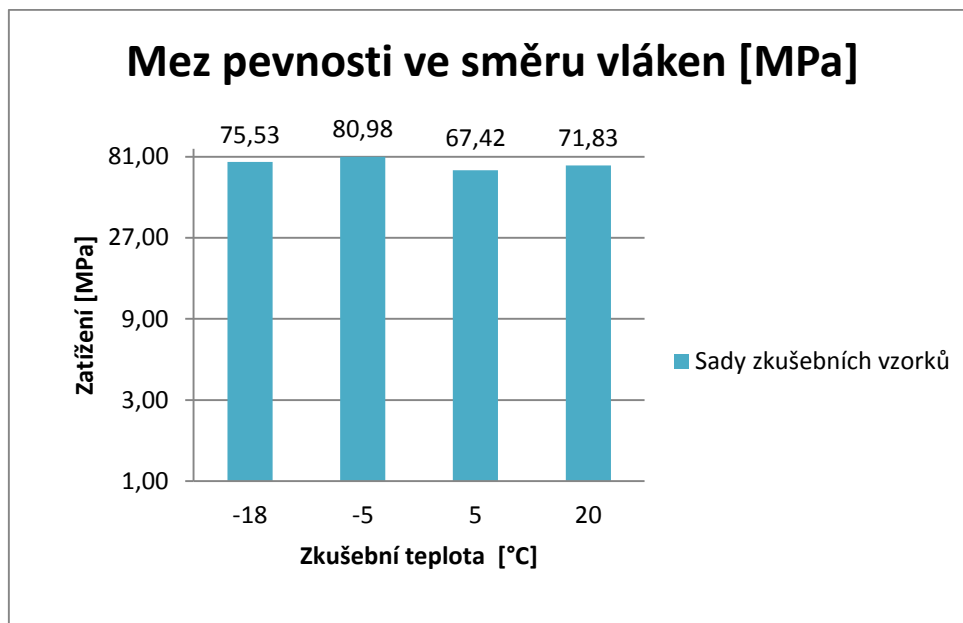
Výsledné meze pevnosti jsou zaznamenány v tabulce (Tab.6), ve které jsou mimo jiné statistické hodnoty, jejichž metody zpracovávání jsou uvedeny v kapitole 4.7. a 4.8.

i

Tabulka 6: Výsledné hodnoty meze pevnosti ve směru vláken

MEZ PEVNOSTI VE SMĚRU VLÁKEN				
STATISTICKÉ CHARAKTERISTIKY	-18 °C	-5 °C	5 °C	20 °C
Vlhkost [%]	9,548%	9,341%	8,380%	10,201%
Hustota [kg.m⁻³]	439	429	440	426
Střední hodnota [MPa]	75,53	80,98	67,42	71,83
Chyba střední hodnoty	0,816	0,683	0,996	0,843
Medián [MPa]	77,33	82,10	69,64	73,48
Směrodatná odchylka [MPa]	7,9223	6,6300	9,6688	8,1870
Variační koeficient [%]	10,489	8,186	14,341	11,398
Rozptyl výběru	62,7621	43,9419	93,4857	67,0274
Šikmost	-0,4951	-0,7739	-0,3400	-0,2311
Špičatost	-0,5611	0,6608	-0,8199	-0,7164
Maximum [MPa]	89,8	92,3	84,9	86,9
Minimum [MPa]	58,5	64,9	47,4	54,3
Rozdíl max-min [MPa]	31,28	27,40	37,51	32,55
5% kvantil	62,64	66,64	51,62	58,32
Pevnost v 12% vlhkosti [MPa]	39,56	42,41	35,29	37,65
Součet [MPa]	2265,88	2429,33	2022,65	2154,95
Počet n	30	30	30	30

Porovnání pevnosti lze vidět na grafu 3, kdy nejvyšší pevnosti dosahovaly vzorky, které byly klimatizovány při teplotě -5 °C, zatímco nejmenší pevnosti dosahovaly vzorky klimatizované na teplotu +5 °C.



Graf 3: Mez pevnosti ve směru vláken

3.6. METODA ZJIŠŤOVÁNÍ MODULU PRUŽNOSTI V TLAKU PODÉL VLÁKEN

Pro tuto zkoušku byly potřebné výsledné hodnoty ze zkoušky meze pevnosti v tlaku ve směru vláken.

Pro zjištění modulu pružnosti bylo potřeba pracovat s hodnotami, které nám vygeneroval lis ve zkoušce tlaku ve směru vláken. Z těchto hodnot byl zpracován pro každé tělísko graf a zjišťoval se 30 % modul pružnosti, jelikož zde byl předpoklad lineárního směru. Následně byl proveden výpočet dle vztahu /9/ pro modul pružnosti podél vláken v MPa.

$$E = \frac{F_{\dot{u}} \cdot l}{a \cdot b \cdot \Delta u} [MPa] \quad /9/$$

F_ú ... 30% pevnost v tlaku [N]

l ... délka zkušební tělesa [mm]

a, b ... rozměry zkušební tělesa [mm]

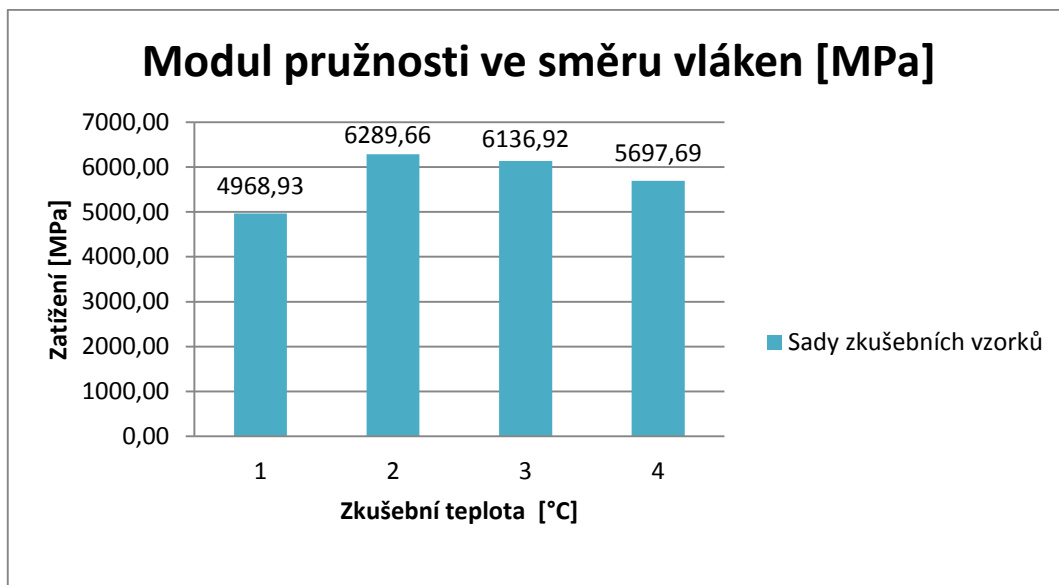
Δu ... absolutní pružná deformace ve směru silového působení dosažená v 30% [mm]

Po vypočtení všech hodnot modulu pružnosti byl proveden aritmetický průměr hodnot a následně byly vypočteny statistické hodnoty. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tab.7).

Tabulka 7: Výsledné hodnoty modulu pružnosti ve směru vláken

MODUL PRUŽNOSTI VE SMĚRU VLÁKEN				
STATISTICKÉ CHARAKTERISTIKY	-18 °C	-5 °C	5 °C	20 °C
Vlhkost [%]	9,548%	9,341%	8,380%	10,201%
Hustota [kg.m⁻³]	439	429	440	426
Střední hodnota [MPa]	4968,93	6289,66	6136,92	5697,69
Chyba střední hodnoty	73,700	107,643	85,354	98,998
Medián [MPa]	4879,94	6308,36	6081,14	5769,90
Směrodatná odchylka [MPa]	715,49	1045,01	828,63	961,08
Variační koeficient [%]	14,39931	16,61474	13,50233	16,8679
Rozptyl výběru	511928,4	1092045	686624,3	923676,1
Šikmost	0,7155	-0,4525	0,3472	-0,1573
Špičatost	1,5247	0,3685	1,1707	-0,2088
Maximum [MPa]	7186,79	8256,55	8496,67	7494,39
Minimum [MPa]	3857,19	3797,13	4335,66	3575,66
Rozdíl max-min [MPa]	3329,60	4459,42	4161,01	3918,73
5% kvantil	3891,13	4354,06	4878,81	4136,66
Modul pružnosti v 12% vlhkosti [MPa]	4725,26	4791,89	4674,35	4341,87
Součet [MPa]	149067,95	188689,66	184107,71	170930,69
Počet n	30	30	30	30

Srovnání jednotlivých modulů pružnosti lze vidět na grafu 4. Nejvyšší hodnoty dosáhla sada vzorku, která byla klimatizována na -5 °C, zatímco nejmenšího modulu pružnosti dosáhla sada vzorků klimatizována na -18 °C.



Graf 4: Modul pružnosti ve směru vláken

Hodnoty modulu pružnosti nejsou závadějící, vzhledem k tomu, že dřevěné vzorky byly malé a pro zkoušku na tlak ve směru vláken byl použit lis, který je primárně používán pro betonové vzorky, tudíž nemá takovou citlivost a přesnost, jakou mají lisy pro dřevěné materiály.

3.7. PŘEPOČET PEVNOSTI A MODULU PRUŽNOSTI NA 12% VLHKOST DŘEVA

Mez pevnosti σ_w pro vlhkost 12% podle vzorce z normy ČSN 49 0110 [3]:

$$\sigma_{12} = \sigma_w (1 + \alpha(w - 12)) [MPa] \quad /10/$$

σ_w ... Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken [MPa]

α ... opravný vlhkostní koeficient, hodnota stejná pro všechny dřeviny 0,04

w ... vlhkost zkušebního tělesa [%]

Modul pružnosti v tlaku podél vláken při vlhkosti dřeva 12 % se vypočítá podle vzorce z normy ČSN 49 0111 [4]:

$$E_{12} = E(1 + \alpha(w - 12))[MPa] \quad /11/$$

E ... Modul pružnosti v tlaku ve směru vláken [MPa]

α ... opravný vlhkostní součinitel 0,02

w ... vlhkost zkušebního tělesa [%]

3.8. METODA ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT (STATISTICKÁ METODA)

Pro další zpracování výsledků a možné porovnání byl použitý počítačový program MS Excel. Data byla zpracována dle následujících statistických charakteristik:

- Aritmetický průměr
- Směrodatná odchylka
- 5 % kvantil

ARITMETICKÝ PRŮMĚR

Jedná se o statistickou veličinu, která typicky popisuje soubor mnoha dat. Jednoduše řečeno se jedná o součet všech hodnot, které je vydělené jejich počtem. Obecně se setkáváme s pojmem průměr, kterým se myslí právě aritmetický průměr.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad /12/$$

n ... počet naměřených hodnot

x_j ... naměřené hodnoty

SMĚRODATNÁ ODCHYLKA

Jedná se o kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od jejich aritmetického průměru.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad /13/$$

n ... počet naměřených hodnot

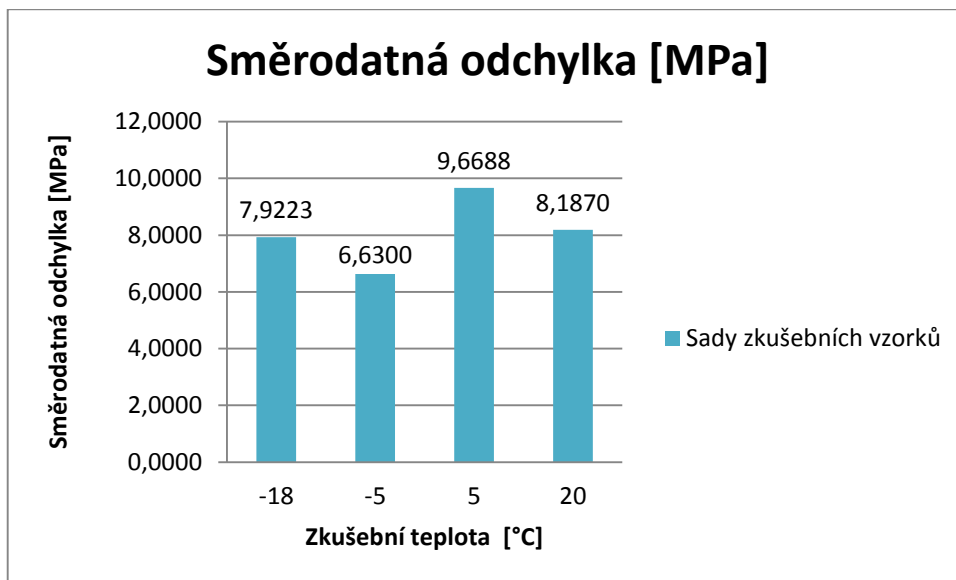
x_j ... naměřené hodnoty

5% KVANTIL

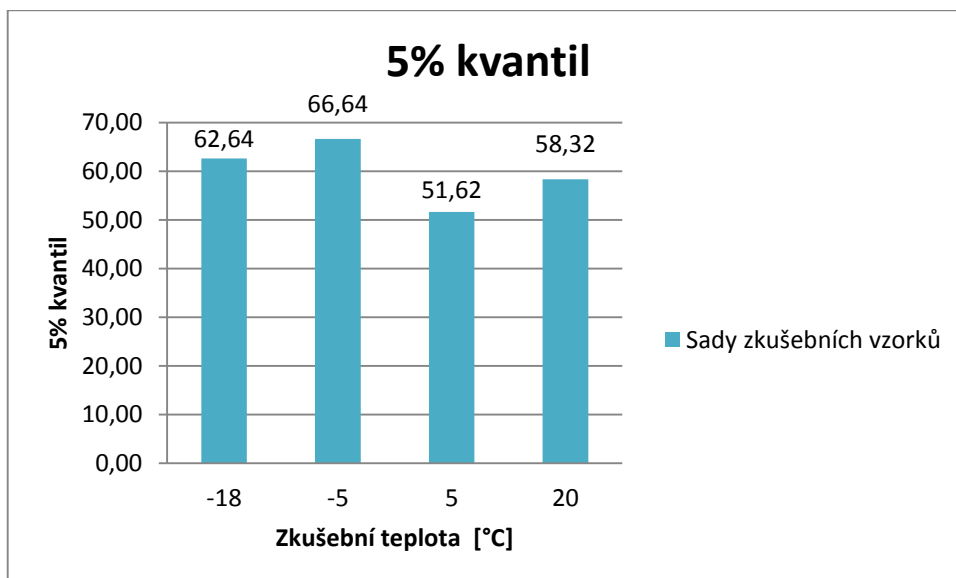
Kvantil je míra polohy rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny. Popisuje body, ve kterých distribuční funkce náhodné proměnné prochází danou hodnotou. Pro naše statistické vyhodnocení byl použit 5% kvantil.

3.9. VÝSLEDKY

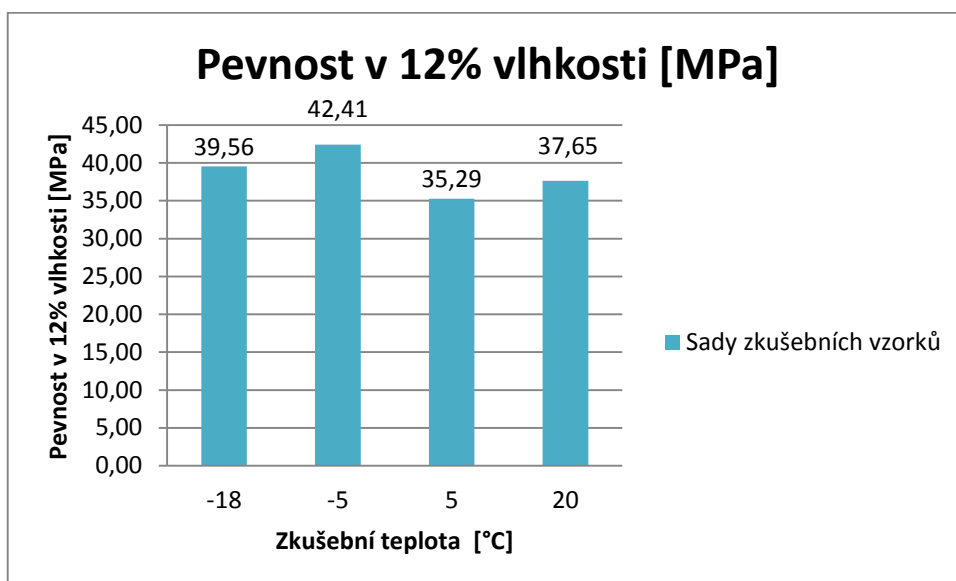
3.9.1. STATISTICKÉ HODNOSTY PRO MEZ PEVNOSTI VE SMĚRU VLÁKEN



Graf 5: Směrodatná odchylka pro mez pevnosti ve směru vláken [MPa]

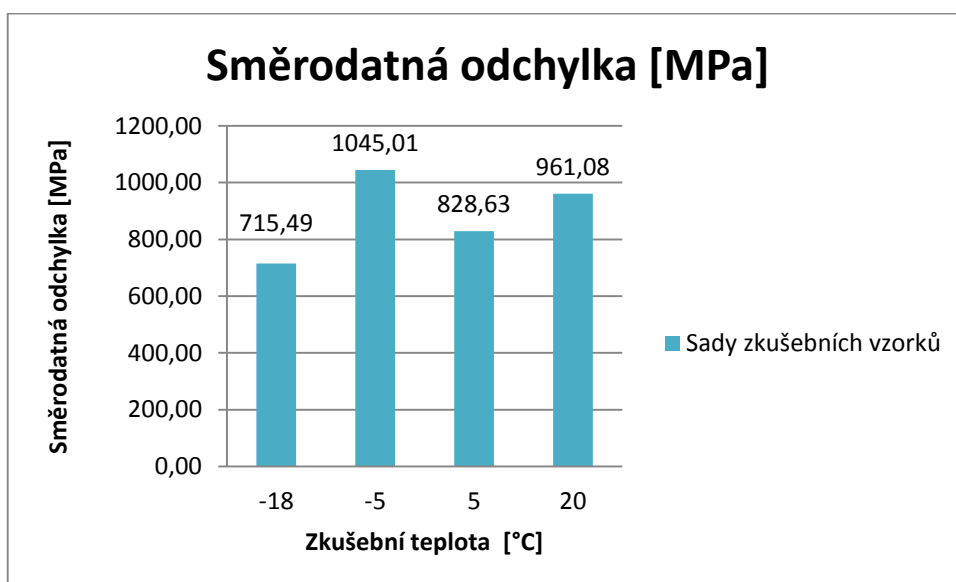


Graf 6: 5% kvantil meze pevnosti ve směru vláken

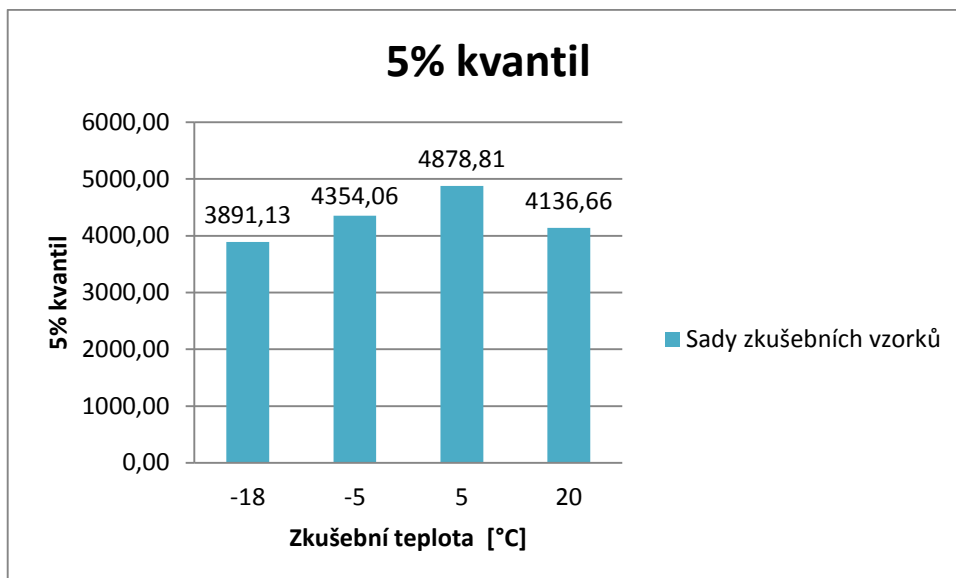


Graf 7: Hodnoty meze pevnosti při 12% vlhkosti [MPa]

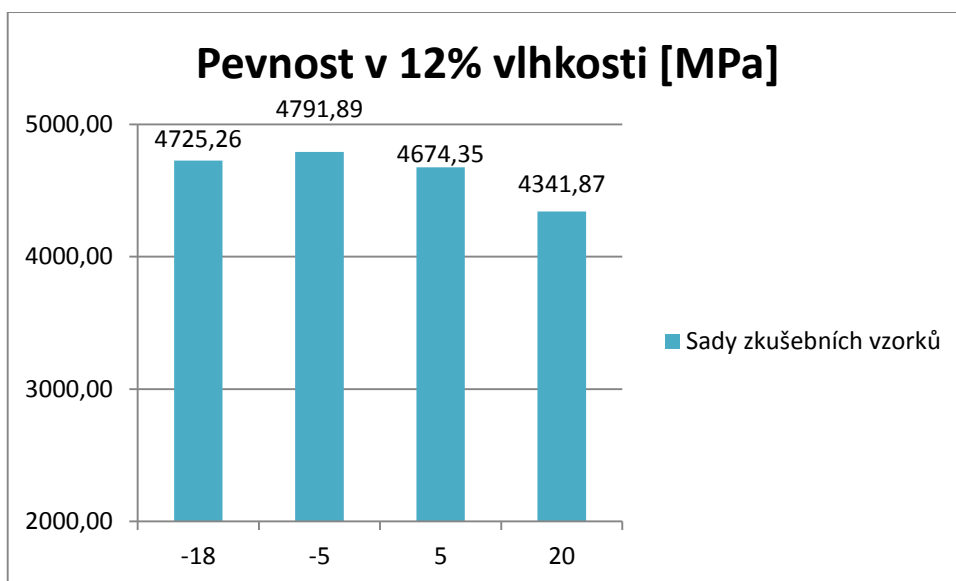
3.9.2. STATISTICKÉ HODNOTY PRO MODUL PRUŽNOSTI VE SMĚRU VLÁKEN



Graf 8: Směrodatná odchylka modulu pružnosti ve směru vláken [MPa]



Graf 9: 5% kvantil modulu pružnosti ve směru vláken



Graf 10: Hodnoty modulu pružnosti při 12% vlhkosti [MPa]

4. ZÁVĚR

Z experimentální části vyplývá, že změny teplot mají vliv na pevnost v tlaku ve směru vláken a na modul pružnosti ve směru vláken. I když byla tělíska ke zkoušení na tlak vytahována přímo z klimatického zařízení, mohlo dojít k malé odchylce v teplotě a vlhkosti. Byl kontrolován vzhled zkušebních tělísek jak při samotném výběru, tak v průběhu přípravy na zkoušení. Tudíž lze vyloučit vliv vad dřeva. Významným faktorem pro vliv na pevnost a modul pružnosti je hustota a vlhkost.

Při zkoušce v tlaku ve směru vláken bylo postupováno dle normy ČSN 49 0110. Zkouška byla provedena na čtyřech sadách zkušebních tělísek, kdy každá sada byla vystavena příslušnému klimatu. Vliv teploty na zkušební tělíska byl znatelný. Zvláštní bylo, že rozdíl mezi $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ byl $3,7\text{ MPa}$, zatímco rozdíl mezi $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ byl $8,11\text{ MPa}$. Nejvyšší průměrné hodnoty dosáhla sada vzorků V2, klimatizovaná na $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy její střední hodnota byla $80,98\text{ MPa}$. Nejnižší průměrnou hodnotu měla sada V3, klimatizovaná na $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy střední hodnota meze pevnosti byla $67,42\text{ MPa}$.

Při výpočtu modulu pružnosti ve směru vláken byly použity hodnoty ze zkušebního lisu při zkoušce na tlak ve směru vláken. Následně se vypočítal 30 % modul pružnosti, vzhledem k předpokladu, že v této hodnotě je směr lineární. Nejnižší průměrný modul pružnosti byl zjištěn u sady V1, vzorky klimatizovány na $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy střední hodnota byla $4968,93\text{ MPa}$. Nejvyšší průměrná hodnota byla zjištěna u sady V2, vzorky klimatizovány na $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy střední hodnota dosahovala $6289,66\text{ MPa}$. Avšak rozdíl mezi $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ byl $152,74\text{ MPa}$. Domnívám se, že malý rozdíl v pevnosti souvisí s malým rozdílem teplot. Důležitým faktorem výsledných hodnot je velikost zkušebních tělísek. Dalším faktorem je použití zkušebního lisu, který slouží primárně pro zkoušení betonových a cementových tělísek. Tento lis nedokáže zaznamenat deformaci tak přesně, jako přístroje určené ke zkoušení dřevěného materiálu. Tudíž výsledné hodnoty ze zkoušky na modul pružnosti ve směru vláken nejsou adekvátní a slouží pouze jako výsledné hodnoty mého experimentu.

V porovnání s vědeckými texty, byly při mém experimentu klimatizovány tělesa při minimálních rozdílech teplot. Teploty -18 °C, -5 °C, 5 °C a 20 °C nemají velký rozdíl a proto byly výsledné hodnoty velmi podobné. V rámci experimentů, ze kterých jsem čerpala, byla tělíska klimatizována na teploty 20 °C, 0 °C, -30 °C, -70 °C, -110 °C, -160 °C a -196 °C. Při těchto teplotách je vliv na pevnost dřeva markantní a výsledné hodnoty jsou znatelně odlišné.

Poděkování

Chtěla poděkovat své vedoucí Ing. Janě Daňkové, Ph.D za veškerou pomoc a poskytnuté rady při zpracování a realizaci mé bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině, příteli a přátelům za podporu.

Bakalářská práce vznikla za podpory projektu Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin – Projekt udržitelnosti LO1406. Projekt je podporován Národním programem udržitelnosti financovaném ze státního rozpočtu ČR.

Seznam použité literatury

- [1] ČSN 49 0103:1979; *Drevo – Zisťovanie vlhkosti při fyzikálních a mechanických skúškach*
- [2] ČSN 49 0108: 1993; *Drevo – Zisťovanie hustoty*
- [3] ČSN 49 0110: 1979; *Drevo – Medza pevnosti v tlaku v smere vlákien*
- [4] ČSN 49 0111: 1991; *Metóda zisťovania modulu pružnosti v tlaku pozdkž vlákien*
- [5] ČSN EN 844-1: 1997; *Kulatina a řezivo – Terminologie – Část 1: Obecné termíny společné pro kulatinu a řezivo*
- [6] GREEN, David W.; WINANDY, Jerrold E.; KRETSCHMANN, David E. *Mechanical properties of wood*. 1999.
- [7] POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., & BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. vyd. Bratislava: Príroda, as, 1997. 485 s. ISBN 80-07-00960-4.
- [8] SVOBODA, L. A KOLEKTIV: *Stavební hmoty*. JAGA, Bratislava, 2005, 471p. ISBN 80-8076-007-1.
- [9] ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ, L. *Stavba dřeva*. 1 vydání, MZLU Brno 1994. ISBN 80-7157-347-7.
- [10] ZEIDLER, A. *Lexikon dřeva*. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2012
- [11] ZHAO, L., JIANG, J., LU, J., ZHAN, T. 2015, *Flexural property of wood in low temperature environment*. *Cold Regions Science and Technology*, 116, 65-69.

Seznam obrázků

Obrázek 1 : Schématické znázornění základních řezů kmenem, P-příčný řez, R-radiální řez, T-tangenciální řez [9]	3
Obrázek 2: Příčný řez smrkovým dřevem [9]	4
Obrázek 3: Mikroskopická struktura smrkového dřeva, J-Jarní dřevo, L-Letní dřevo, P-Pryskyřičný kanálek podélný [9].....	4
Obrázek 4: Pracovní diagram dřeva pro namáhání v tlaku/tahu rovnoběžně s vlákny [9]	6
Obrázek 5: Tah a tlak znázorněný na dřevěných bezvadých tělesech	7
Obrázek 6: Diagram napětí - deformace smrkového dřeva v tlaku ve směru vláken pod mezí úměrnosti [7]	8
Obrázek 7: Pevnost v tlaku ve směru vláken ($\sigma_{p }$) [7]	12
Obrázek 8: Vliv vlhkosti na pevnost dřeva, A-Napětí ve směru vláken, B-Ohyb, C-Tlak ve směru vláken, D-Komprese kolmo k vláknům, E-Prodložení kolmo k vláknům [11].....	14
Obrázek 9: Smrkové bezvadé tělísko	17
Obrázek 10: Vada dřeva - Suk	18
Obrázek 11: Vada dřeva - Poškození hmyzem	18
Obrázek 12: Sušárna MEMMERT UF 160 s nucenou cirkulací.....	19
Obrázek 13: Mrazicí box LABOR TECH.....	23
Obrázek 14: Klimatizační komora CTS	23
Obrázek 15: Zkušební stroj FORM+TEST CTS C-40/1000/S	24
Obrázek 16: Uložení zkušební vzorku do lisu.....	25
Obrázek 17: Příklad porušení vzorku při teplotě -18 °C.....	26
Obrázek 18: Příklad porušení vzorku při teplotě -18 °C.....	26
Obrázek 19: Příklad porušení vzorku při teplotě -18 °C.....	26
Obrázek 20: Příklad porušení vzorku při teplotě -18 °C.....	26
Obrázek 21: Příklad porušení vzorku při teplotě -5 °C.....	27
Obrázek 22: Příklad porušení vzorku při teplotě -5 °C.....	27
Obrázek 23: Příklad porušení vzorku při teplotě +5 °C	28
Obrázek 24: Příklad porušení vzorku při teplotě +5 °C	28

Seznam tabulek

Tabulka 1: Obecné vlastnosti smrku ztepilého [10]	4
Tabulka 2: Porovnání smrkového dřeva s ostatními jehličnatými dřevinami [10]	7
Tabulka 3: Výsledné vlhkosti zkušebních souborů	20
Tabulka 4: Výsledné hustoty jednotlivých souborů	21
Tabulka 5: Rychlost zatěžování	25
Tabulka 6: Výsledné hodnoty meze pevnosti ve směru vláken	29
Tabulka 7: Výsledné hodnoty modulu pružnosti ve směru vláken	31

Seznam grafů

Graf 1: Vlhkost zkušebních vzorků	20
Graf 2: Hustota zkušebních vzorků	22
Graf 3: Mez pevnosti ve směru vláken	30
Graf 4: Modul pružnosti ve směru vláken	32
Graf 5: Směrodatná odchylka pro mez pevnosti ve směru vláken [MPa]	35
Graf 6: 5% kvantil meze pevnosti ve směru vláken	35
Graf 7: Hodnoty meze pevnosti při 12% vlhkosti [MPa]	36
Graf 8: Směrodatná odchylka modulu pružnosti ve směru vláken [MPa]	36
Graf 9: 5% kvantil modulu pružnosti ve směru vláken	37
Graf 10: Hodnoty modulu pružnosti při 12% vlhkosti [MPa]	37